

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

Measurement of the Top Quark Mass by
Dynamical Likelihood Method using the Lepton plus Jets
Events in 1.96 TeV Proton-Antiproton Collisions

1.96TeV 陽子、反陽子衝突型実験における量子力学
的尤度法によるトップクォークの質量測定

申 請 者

氏 名

寄田

浩平

Yorita

Kohei

専攻・研究指導
(課程内のみ)

物理学及応用物理学専攻 素粒子実験研究

2004 年 12 月

ここから概要 (3 6 文字 × 3 7 行)

電弱統一理論と量子色力学からなる標準理論は様々な実験データを説明し、高エネルギー素粒子物理学に大きな貢献と信頼をもたらしてきた。1995年、米国イリノイ州、フェルミ国立加速器研究所 (FNAL) における加速器、テバトロン (重心系エネルギー 1.8 TeV の陽子・反陽子衝突型実験) によるトップクォークの発見はその中でも最も大きな成果の一つといえる。なぜなら、標準理論はその存在を5番目に発見されたクォーク、ボトムクォーク (b quark) のアイソスピンの2重項として強く要請していたからである。トップクォークの重要な性質の一つはその重い質量にある。標準理論の枠組みの中では、一般に粒子の質量は予言されないため、その直接的な性質説明は実験測定に委ねられている。2004年現在の世界平均値、 $178 \text{ GeV}/c^2$ というその質量は現在知られている基本粒子 (クォーク、レプトン、ゲージボソン) の中で最も重く (ボトムクォークのおよそ35倍)、電弱対称性の破れのスケールに極めて近い。また、その精密測定は電弱過程における様々な変数の決定に役立つばかりでなく、Wボソンの質量とともにヒッグス粒子の質量に制限を与えることができる。ヒッグス粒子は基本粒子に質量を与える機構として標準理論の中で必要不可欠な粒子であるが、未だに発見されていない。したがって、トップクォークの性質をより良く理解することは素粒子物理学の最大課題の一つと言える。

トップクォークの発見をもたらしたテバトロン実験 (RunI) は1996年、一旦その運転を終了し、エネルギーの強化 (重心系エネルギー 1.96 TeV) とデータ量の増加を目的に改良され、2001年よりRunIIとして再運転を開始した。テバトロンは現在稼働中の加速器の中で世界最高エネルギーであり、トップクォークを生成するに足るエネルギーを持った唯一の加速器である。本論文はFNALにある2つの汎用検出器の内の一つ、Collider Detector at Fermilab (CDF) のRunII実験データを用いた、トップクォークの質量測定を目的とする。

標準理論において、トップクォークは強い相互作用によるグルーオンを通し対生成される ($t\text{-}\bar{t}$)。トップクォークは生成された後、その短い寿命のためハドロニ化する前に、ほぼ100%の確率でボトムクォークとWボソンに崩壊する。クォークはカラーの閉じ込め、ハドロニ化により実験的にはジェットと呼ばれる粒子束で観測される。またWボソンからのニュートリノは直接観測されないため、測定された全横運動量のアンバランスにより、消失エネルギーとして測られる。Wの崩壊モードにより、トップクォーク対生成事象の終状態は主に以下の3つに分類される。(1) Dilepton: 2つのWがレプトン-ニュートリノ対に崩壊 (2つのレプトンと2つのジェット, 大きな消失横運動量)。(2) Lepton+Jets: 片方がレプトニック、もう片方がハドロニックに崩壊 (1つのレプトン、4つのジェット、消失横運動量)。(3) All-hadronic: 両方のWがハドロニック崩壊 (6つのジェット)。この解析で使われたのは、lepton+jets 事象である。これは統計量、

信号/雑音との比という観点でトップクォークの質量測定には最も適した過程といえるからである。さらにこの終状態の主な雑音事象であるジェットを伴ったWボソン生成は、bクォーク(bジェット)の存在を要求することによって顕著に減らすことができる。CDFではビーム軸に近いシリコン検出器を用い、ジェットの2次崩壊点を再構成することにより、b quarkを同定することができる。CDFで取られた 162pb^{-1} のデータから1つの孤立した高い運動量のレプトン、 20GeV 以上の大きな消失横エネルギー、4つのジェット(うち少なくとも1つはb quark 同定されたジェット)を要求した結果、22候補事象が得られた。その内4.2事象が雑音(W+ジェット等)と見積もられた。この見積もりに伴い、トップクォークの生成断面積を同時に測ることができる。この断面積測定に対しては、2つの独立な方法論(カウンティングとジェットのエネルギーフィット)を用いたが、結果はその誤差の範囲内で一致した。 $(5.6\pm 1.5$ と $6.0\pm 2.0\text{pb})$

質量測定をする時、大きな問題となるのがトップクォークを再構成する際に生ずる、観測量(ここではジェット)から素過程のパートンへの対応づけである。1つのbジェットが同定されている場合、ニュートリノのビーム(z軸)方向の運動量の不確定性も含め、12パターンの組み合わせが考えられる。従来のトップクォークの質量測定方法は事象毎に1つの質量を可能な組み合わせから χ^2 検定より選び出し、モンテカルロ事象を質量分布のテンプレートとして使い、データを様々な入力質量のテンプレートでフィットすることにより決める方法であった。この方法は特に以下の2つの点が問題となる。(1)1つの質量を χ^2 検定により選び出す時、不正解(間違った組み合わせ)を選ぶ確率は約50%である。(2)候補事象の持つ信号としての情報、力学的性質を最大限利用できていない。この事からもこの方法では精密測定を期待するのは困難である。実際、この方法により本論文結果と同じデータ量から導かれた最新のトップクォークの質量の統計誤差は約 $7\text{GeV}/c^2$ である。本論文で採用したのは量子力学的尤度法(以下DLM)である。DLMは1988年近藤都登教授によって提案された事象再構成方法である。DLMの中で尤度(Likelihood)はトップクォークの生成機構、すなわち単位位相空間あたりの微分断面積の式そのもので定義される($d\sigma/d\Phi$)。この方法の更なる特徴は大きく分けて3つある。1事象内で全ての可能な組み合わせを尤度を重みとして足し上げる。事象毎は積をとり、最大尤度法で質量を求める。雑音事象に対してはモンテカルロによって得られたマッピング(補正関数)によってその効果を考慮する。DLMの特徴が従来の問題点(1)を、また問題点(2)をその生成機構そのものを尤度とすることにより解決、改良していることがわかる。また、微分断面積はLeading Order (LO)で計算してるため、高次の項を無視しているが、1事象の内、4つのジェット(4つ以上ではなく)を要請することにより

高次項の影響を事象選択で最小限にすることができる。

22 候補事象に対し、上で定義された尤度を計算し、雑音事象の効果を考慮した結果得られたトップクォークの質量は、 $177.8 + 4.5 - 5.0$ (統計誤差) ± 6.2 (系統誤差) GeV/c^2 であった。

この結果はRunIIで現在までに得られている6つの結果の中で最も精密な測定である。系統誤差 $6.2 \text{ GeV}/c^2$ の内 $5.2 \text{ GeV}/c^2$ はジェットとの測定から来るものであり、モンテカルロシミュレーションのさらなる理解、データ量の増加に伴い、近い将来、この誤差は最低でも半分にすることが可能である。標準理論を仮定した場合、現在、世界平均のトップクォークの値から推測されるヒッグス粒子の最確値は $114^{+69}_{-45} \text{ GeV}$ 、また 95%信頼度における上限値は 260 GeV である。これは次実験、Large Hadron Collider(LHC)におけるヒッグス粒子探索に対し、質量領域を特定する意味でも大きく役立つ。本論文の結果はこの制限に貢献するばかりでなく、新しい方法論の確立という点でもその研究意義は大きいと言える。

本論文は第1章を序章とし、標準模型とトップクォークの発見からその質量測定の動機、背景、現状について、ヒッグス粒子の質量との関係を中心に議論する。第2章では米国フェルミ研究所の陽子反陽子加速器テバトロンとCDF検出器の構造、機能を紹介する。この解析で重要なのは飛跡検出器とカロリメーター、ミュー粒子検出器である。各々の粒子(レプトン、ジェット、ニュートリノによる消失横エネルギー)の実験的同定方法、さらにbクォークからのジェット(bジェット)の2次崩壊点再構成による同定法を第3章で詳述する。第4章ではCDFで2003年8月までに得られたデータサンプルとモンテカルロ事象、解析に使うトップクォーク事象選択を論じ、実際の候補事象を見積もる。第5章は質量測定と同じデータ量、信号事象を用いたトップクォーク生成断面積測定の結果を紹介する。この測定には2つの独立な方法が使われ(雑音事象のカウンティング法とジェットのエネルギーフィット法)、その結果は誤差の範囲内で一致した。この章の最後に質量解析で実際使われるデータの雑音事象を見積もる。第6章では本論文の質量測定に用いられる方法、量子力学的尤度法(DLM)の詳細を述べる。さらにモンテカルロシミュレーションを使った方法論の確認と解析過程を詳述する。CDF実験で得られた22候補事象から測られた質量測定結果とモンテカルロ事象から予測される統計誤差との比較を第7章にまとめる。第7章で見積もられた統計誤差に加え、全ての系統誤差は第8章で示す。ジェットの測定から来る系統誤差が最も大きい事がわかる。第9章ではDLMの出力(事象尤度と最大尤度質量)をデータとモンテカルロ事象を比較することにより、得られた質量測定結果の妥当性を論じる。最後に、第10章でこの論文をまとめる。

研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論 文	<ul style="list-style-type: none"> • “ Measurement of the $t\bar{t}$ Production Cross Section in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV Using Dilepton Events ” , Phys. Rev. Lett. 93, 142001 (2004), CDF Collaboration (D. Acosta <i>et al.</i>) • “ Making the most of aging scintillator ” , Nuclear Instruments and Method in Physics Research A, Vol.453, pp.245-248 (2000), (S. Cabrera <i>et al.</i>) (15 authors)

研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講 演	<ul style="list-style-type: none"> “ Measurement of the Top Quark Mass with Template Method and DLM at CDF RunII ”, The Division of Particles and Fields(DPF), 2004 年 8 月, CA. USA. 寄田浩平 for the CDF collaboration “ Measurement of the Top Quark Mass in RunII at CDF using DLM ” フェルミ研究所理論実験合同セミナー, 2004 年 6 月, FNAL USA. 寄田浩平 “ Top Quark Mass Measurement by DLM in the lepton+jets channel at CDF ” American Physics Society(APS), 2004 年 5 月, CO. USA. 寄田浩平 for the CDF collaboration “ トップクォーク事象、レプトン+ジェットチャンネルの解析 ”、日本物理学会 東北大学、2003 年 3 月、寄田浩平、近藤都登 “ トップクォーク対生成におけるレプトン+4 ジェット過程の DLM による再構成 ”、日本物理学会 立命館大学、2002 年 3 月、寄田浩平、土屋亮、近藤都登 “ トップクォーク対生成におけるパリティ保存の検証法 ”、日本物理学会 沖縄国際大学、2001 年 9 月、寄田浩平、蛭名幸二、土屋亮、近藤都登
著 書	なし
その他 (投稿中)	<ul style="list-style-type: none"> “ Measurement of the t anti-t Production Cross Section in p \bar{p}-bar Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV Using Kinematic Fitting of b-tagged Lepton+Jet Events ”, arXiv:hep-ex/0409029, 2004 年 9 月, Phys. Rev. D (投稿中), CDF Collaboration (D. Acosta <i>et al.</i>) “ Measurement of the t anti-t Production Cross Section in p \bar{p}-bar Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV Using Lepton+jets Events With Secondary Vertex B-tagging ”, arXiv:hep-ex/0410041, 2004 年 10 月, Phys. Rev. D (投稿中), CDF Collaboration (D. Acosta <i>et al.</i>) “ Search for Electroweak Single Top Quark Production in p \bar{p}-bar Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV ” arXiv:hep-ex/0410058, 2004 年 10 月, Phys. Rev. Lett (投稿中), CDF Collaboration (D. Acosta <i>et al.</i>),

研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）